

## 誘電体－水境界における電磁波の伝搬実験

田中 聡\* 和田雄介\*\*

The measurement of surface wave transmissions along a boundary between dielectric material and water surface.

Satoshi TANAKA Yusuke WADA

### ABSTRACT

The electro-magnetic field surface wave transmissions over the human bodies are expecting to use the short range wireless communication channels. This experiments are designed to confirm the existence of the surface waves between the dielectric (Acrylics materials) with the water. This structure is similar in electro-magnetic characteristics with the man who wore tight clothes. At first we classified the modes on the microstrip lines which is dipped in water and found out the effective dielectric constant as about 2.5. The measurements of the cylindrical structure model found out the surface wave propagation band from 10MHz to 50MHz.

キーワード：高周波, 表面波伝播, マイクロストリップライン, モード解析

Keywords: RF, Surface Wave, Microstrip Line, Mode analysis

### 1. まえがき

近年, 情報端末の着衣を身に付け, いつでもどこでも情報をやりとりできるウェアラブルコンピューティングの研究が盛んに行われている[1]. ウェアラブル機器ではやや重く筐体の大きいメインコンピュータ本体は腰などの重量を支えやすいところにとりつけ, 頭部や腕部など離れたところに HMD やヘッドフォン, または入力ターミナルを装着する. 本体とこれらの子機間は有線または Bluetooth などの近距離無線システムを用いて接続し機器間の連携した動作を実現している. 今後, コンピュータの小型化により, メインコンピュータが不必要になることも予想されるが, 機器間の通信へのニーズはへの技術的な研究が進められている.

有線による接続はそのケーブルの可とう性や外観に難があり, どこでも使えるというわけではない. 一方, 近距離無線による接続は有線のような難がない代わりに無線の外部への放射により盗聴や混信による妨害を受ける可能性がある. 特に強度の暗号化等による防護が困難な小型機器では, セキュリティ

の確保は今後ますます重要になると考えられる.

従来, 電磁波と人体の関係について周波数の低い波は体内を簡単に通過し, 人体の大きさと同程度の波長の波は共振すること, そして, さらに周波数の高い波に対しては吸収体とみなすことができるとされていた. ところが, MIT の Zimmerman らは人体表面を伝送路とする通信システムを提唱し 100kHz-500kHz の 400kHz 帯域幅の電磁波を用いて 417KBPS の通信速度を得られるとした[2]. また, 田島らは 10MHz での信号伝播に成功している[3][4]. これらの結果から, 10MHz 以下の低周波信号が人体の表皮面に沿って伝播するという表面波モードがあることが分かってきた.

しかし, 人体の露出部分の電波伝搬ではこれ以上の高い周波数での表面波伝送は難しい可能性がある. そこで人体表面にさらに誘電体の線路となる部分を重ねることによって, 表面波の放射による損失を抑え, 伝送路を確保することができるのではないかと考えた. たとえば, アクリルや綿製の着衣と人体表面の間での伝播が可能ではないかと考えた. そこで, 我々は人体のモデルを検討し, アクリルと水

\*福山大学 工学部

\*\* (株) 北川鉄工

の境界の電磁波伝播を調べることににより、模擬的な実験とする。今回の研究では、アクリル板（誘電体）と水（高含水組織）の境界に励起される表面波を実測することを目的とした。

最初にアクリル平板上に作られたマイクロストリップラインを用いてアクリル自体の比誘電率を求め、次いでアクリル板を水中に浸した場合の電磁界モードについて研究した。ついで、円柱状のアクリル製水槽の上下にアンテナを取り付けて伝搬モードを観測した。

## 2. 生体の誘電体モデル

生体の電磁気学的なモデルとして一般には図1の半無限平板層状モデルもしくはこれを球形で近似した球体モデルが用いられる。半無限平板層状モデルでは入射電磁界の構造も単純な平面波とし、平板構造に対しては表面に垂直に入射するものとして解析する。このような仮定は、生体表面の曲率半径が波長に比べて大きい場合に対応する。

図1のモデルにおいて、皮膚の比誘電率が非常に高いので、表面にアクリル材を密着させて表面波を測定することを考えれば、人体の電気モデルとしてよく用いられるハイパーサーミア用の標準ファントムでなくても、普通の脱イオン水で代替可能であると判断した。

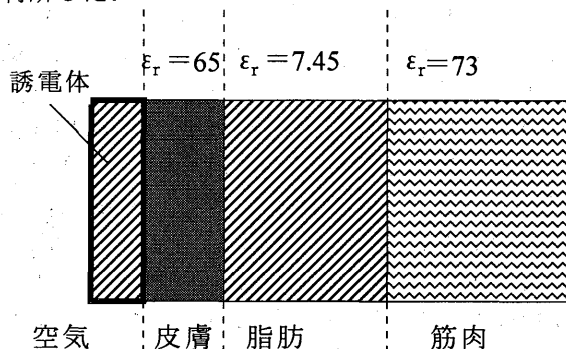


図1. 半無限平板層状モデル

## 3. 実効誘電率測定実験

アクリル-水境界が結合した場合の実効誘電率をを測定するためにマイクロストリップライン法を用いて測定を行った。マイクロストリップラインは図2のように太さの違う長さ 509mm のストリップ導体を平行に並べたものであり、各マイクロストリップラインは一方が入力端子であり、他方は短絡または開放条件が設定できるようになっている。なお、

アクリル板の厚さは3mm, ストリップ導体の厚さは30μm である。この系を水の中に沈めて各接続端子からみた S11 および S21 をスカラネットワークアナライザで測定した。なお使用した水は水道水をイオン交換樹脂で脱イオン化したもので、直流における導電率は 300μS/cm 以下である。

マイクロストリップ線路上を伝搬する信号は準 TEM モードであるが周波数が高くなると混成波モードが発生する。今回の実験では比較的低い周波数帯に注目しているので TEM 波のみを考慮することにする。このとき、マイクロストリップラインの長さ  $d$  と終端の条件により共振モードは伝送線路上の波長  $\lambda$  との間には

$$(2N) \frac{\lambda_g}{4} = d \quad (1b)$$

$$(2N + 1) \frac{\lambda_g}{4} = d \quad (1a)$$

ただし、( $N = 0, 1, 2, \dots$ ) となる。

一方、自由空間においては、周波数  $f$  と真空中の光速  $c$  と波長  $\lambda$  より、

$$\lambda_1 = \frac{c}{f} \quad (2)$$

が得られる。

マイクロストリップライン上の波長  $\lambda_g$  とその実効誘電率  $\epsilon_{eff}$  の間には

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_1} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

という関係式があるため

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_g} \right)^2 \quad (4)$$

が得られる。

一方、M.V.Schneider によりマイクロストリップ線路の  $\epsilon_{eff}$  の実験式が求められている[6].

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{W/h}} \quad (5)$$

ただし、 $h$ : 基板厚[mm],  $t$ : 導体厚[mm]

$w$ : マイクロストリップライン幅[mm]

ここで  $\epsilon_r$  は材質の比誘電率であり、空気中に置かれている場合の式である。アクリルの比誘電率は文献によると約 2.5 ~ 4.5 程度とされているので、空気中に置かれた厚さ 3mm のアクリル基板上に形

成されたマイクロストリップラインの特性インピーダンスを測定器の入出力インピーダンスと整合するために  $50\Omega$  とするには、ストリップライン幅  $W=5 \sim 9\text{mm}$  でなければならない。また、水中ではさらに波長短縮率が短くなるとを想定して、実際には  $W=7 \sim 10\text{mm}$  のマイクロストリップ線路を作成した。

ここで使用したアクリル板の比誘電率を求めるために、空気中での  $S_{11}$  をそれぞれの線路のついて求めた。この結果  $W=10\text{mm}$  において信号の反射が少なくなることが見いだされ、この線路による開放短絡法による実験によって、実効誘電率  $\epsilon_{\text{eff}}$  は 2.2 程度であり、このことからアクリル自体の比誘電率  $\epsilon_r=2.5$  と比較的低いことが分かった。

次にこのマイクロストリップ構造を水中に入れて、水中での実効誘電率とマイクロストリップライン間すなわち誘電体の表面や内部を伝搬する伝搬モードを求める。ここでは  $W=10\text{mm}$  の  $S_{11}$  と、 $W=10\text{mm}$  と  $W=9\text{mm}$  の線路の間の  $S_{12}$  と  $S_{21}$  を測定した結果を図 3 に示す。  $S_{11}$  の実験結果を大気中の場合と比較すると、周期性が失われており、モード周波数が

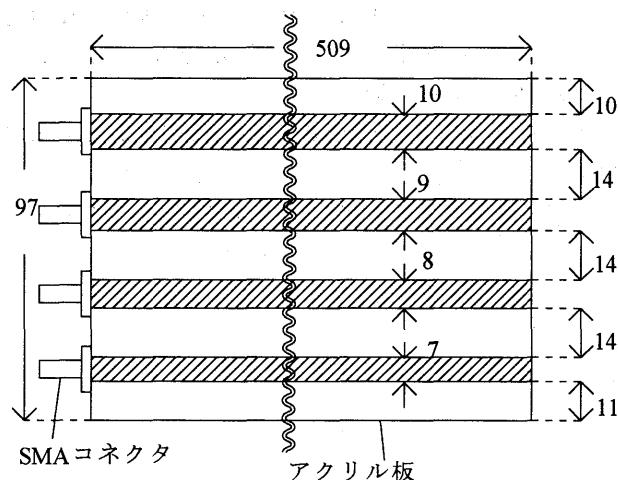


図2 試作マイクロストリップ線路 (単位mm)

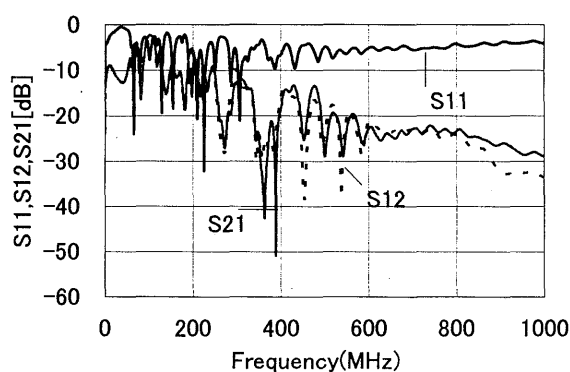


図3 Sパラメータ

シフトしていることが分かる。これらのモードの中からマイクロストリップ線路に共振するモードとして、 $155\text{MHz}$  を基準として  $\epsilon_{\text{eff}}=3.3 \sim 3.6$  のモード、そして、 $125.4\text{MHz}$  を基準とした  $\epsilon_{\text{eff}}=5.1 \sim 5.5$  のモードが分離できる。

次に上記の共振モードの中で  $S_{21}$  もしくは  $S_{12}$  において、同じ周波数で、その値が極小値をとるモードを周波数の低い順に並べ、これらのモードの中で周波数が整数比もしくは半整数比で変化するものを見つけ、これをストリップラインの共振モードとしする。次いで、 $S_{21}$  のグラフ上で通過となる周波数と  $S_{11}$  の周波数が、ほぼ同じものを見つけるとその周波数は、伝搬モードとみることができる。この結果から  $155\text{MHz}$  と  $124.5\text{MHz}$  はいずれも伝搬モードと判断される。この伝搬モードの電磁界様式については現在研究中であるが、導体のない場所の伝搬であることから表面波モードと判断される。

#### 4. 円筒構造を用いた実験

人体の部分(手、足、胴など)を単純な形状で表すと円柱とみなせる。ここでは、高さ  $1020\text{mm}$ 、内径  $200\text{mm}\phi$ 、厚さ  $4\text{mm}$  アクリル製パイプ内に水を満たし、アクリルと水の境界面を伝搬する表面波モードを調べる実験を行った。図4に示すようにアクリル製パイプの内側と外側の上下に厚み  $30\mu\text{m}$  の銅テープを貼り付けアンテナとした。アンテナは円柱の内側に入出力の測定のため2つのアンテナを取り付け、それらのライン幅  $10\text{mm}$  の銅テープを貼り付け、外側には内側の銅テープを中心となるように  $38\text{mm}$  の銅テープを貼り付けた構造である。なお、2つのアンテナ間隔は  $500\text{mm}$  としている。この円筒容器の中に脱イオン化した水を注入し、上下アンテナ間が完全に充填された状態にする。このとき上下のアンテナ間の  $S$  パラメータを測定した。測定結果を図5に示す。

$S_{11}$  の結果からみてループ状アンテナには  $220\text{MHz}$  を基本周波数とする定在波モードが励起されていることが分かる。 $S_{21}, S_{12}$  はほぼ一致しており、アンテナ系の対称性は良好である。

この実験結果から  $10\text{MHz} \sim 50\text{MHz}$  および、 $200\text{MHz}$  において伝搬領域が存在することが分かる。しかし、 $200\text{MHz}$  の領域は水の充填の前後においてもあまり大きく変化しないこと、そしてこの時の波長が自由空間で容器の共振長に近いことから容器外部を伝搬する波であると判断される。一方、 $10\text{MHz} \sim 50\text{MHz}$  にある伝送帯域は、充填前には帯域幅が  $10\text{MHz}$  程度であったが、充填後に広がるとともに

伝送損失も 10dB 程度に低下している。この領域の伝搬は表面波の混合モードが形成されているとみられる。

## 5. まとめ

マイクロストリップラインをアンテナとした場合に境界を伝搬するモードを測定し、生体モデルの代替としてアクリル板—水境界を考え、アクリル板を水に浸したときに伝搬モードを解析した。まず、実験に使用するアクリル板の比誘電率を求めたが、これが 2.2 ～ 2.5 と比較的低いことが分かった。次にアクリル板を水中に入れたときの実効誘電率については 3.3 ～ 3.6, 5.1 ～ 5.5 などのいくつかのモードに分岐していることが分かった。これらのモードパターンについては今後解析を行っていく。一方、通信として使用するためには 10MHz ～ 50MHz が利用できそうである。

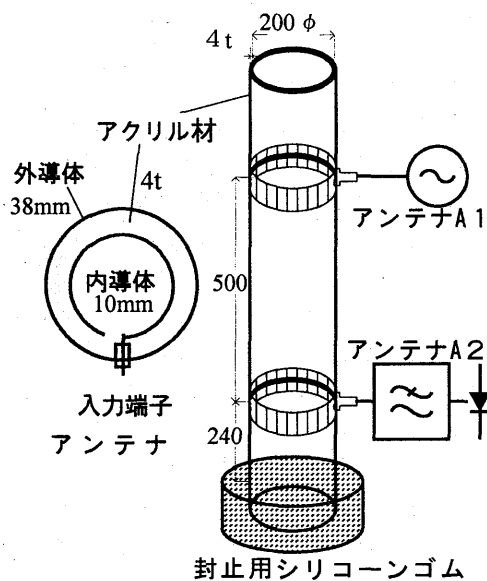


図4 実験装置の構成

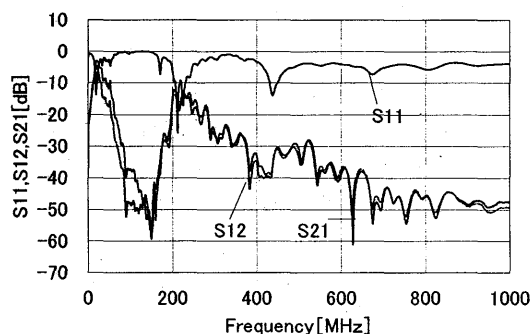


図5 円筒モデルのSパラメータ

近距離無線システムに比べてこうした低い周波数を微弱電波機器として利用する際には、伝送損失を十分に小さくすることができなければならない。今後、送受信機やアンテナの工夫によりこれらの問題を解決することが課題である。また、今回検討しているウェアラブルなネットワークでは、通信路が時々刻々変化するため、こうした新しいデジタル通信技術を用いることにより、伝搬する周波数帯が変化したり、使用できるアンテナが変わった場合でも連続して信号伝送が可能になる。

## 参考文献

- [1]坂上清：“ウェアラブル情報機器の実際”，オプトロニクス社,1999.
- [2]T. G. Zimmerman, Personal Area Networks (PAN): Near-Field Intra-Body Communication, M.S. thesis, MIT Media Laboratory, Cambridge, MA (September 1995).
- [3]N.Matsushita, S.Tajima, Y.Ayatsuka, and J.Rekimoto:"Wearable Key: Device for Personalizing Nearby Environment", ISWC 2000,pp.119-126,Oct.2000.
- [4]藤井 勝之, 伊藤公一, 田島 茂：“人体を伝送路として利用した通信システムのモデル化に関する検討”，映像情報メディア学会誌,Vol.56, No.11, pp.1845-1849, Nov. 2002.
- [5] K.Fujii et al, Proc.IEEEAPS/URSI, vol.3, pp.1071-1074, June2003.
- [6]小西良弘：“実用マイクロ波技術講座～理論と実際 第1巻”，ケイラボ出版 2001.